

Rec'd PCT/PTO 31 MAR 2005

PCT/JP2004/000107

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

09.1.2004

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日  
Date of Application: 2003年 1月31日

REC'D 27 FEB 2004

WIPO

PCT

出 願 番 号  
Application Number: 特願2003-024936  
[ST. 10/C]: [JP2003-024936]

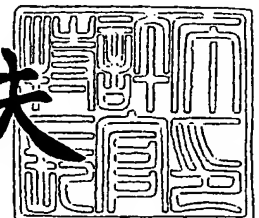
出 願 人  
Applicant(s): TDK株式会社

PRIORITY DOCUMENT  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

2004年 2月13日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今井康夫



BEST AVAILABLE COPY

出証番号 出証特2004-3009005

【書類名】 特許願

【整理番号】 P-04448

【提出日】 平成15年 1月31日

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 G02B 5/00

【発明者】

【住所又は居所】 東京都中央区日本橋一丁目 1 3 番 1 号 ティーディーケイ株式会社内

【氏名】 榎戸 靖

【発明者】

【住所又は居所】 東京都中央区日本橋一丁目 1 3 番 1 号 ティーディーケイ株式会社内

【氏名】 中畑 功

【特許出願人】

【識別番号】 000003067

【氏名又は名称】 ティーディーケイ株式会社

【代理人】

【識別番号】 100100077

【弁理士】

【氏名又は名称】 大場 充

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 085823

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 2次元フォトリック結晶

【特許請求の範囲】

【請求項1】 短辺X1の長さが $x_1$ 、長辺Y1の長さが $y_1$ である長方形を単位格子とし、隣接する4つの単位格子が1つの角を共有するように配列された平面上で、短辺X2の長さが $x_2$ 、長辺Y2の長さが $y_2$ である長方形断面を有する柱状の第1誘電体領域を、各長方形単位格子の前記短辺X1および前記長辺Y1上に配置した2次元フォトリック結晶であって、

前記短辺X1の midpoint および前記長辺Y1の midpoint と前記長方形断面の中心が略一致するように前記第1誘電体領域が配置され、

前記各第1誘電体領域の前記長辺Y2同士が互いに略平行をなし、

$x_1 : y_1 = 1 : \text{略 } 3^{1/2}$ であり、

$x_1 : x_2 : y_2 = 1 : 0.133 : 0.48 \sim 1 : 0.158 : 0.58$ であることを特徴とする2次元フォトリック結晶。

【請求項2】 前記第1誘電体領域は、その長方形断面の前記長辺Y2が単位格子の前記長辺Y1と略平行に配列されていることを特徴とする請求項1に記載の2次元フォトリック結晶。

【請求項3】  $x_1 : x_2 : y_2 = 1 : 0.135 : 1 : 0.48 \sim 1 : 0.150 : 0.54$ であることを特徴とする請求項1または2に記載の2次元フォトリック結晶。

【請求項4】 前記第1誘電体領域の周囲を取り囲みかつ前記第1誘電体領域とは異なる誘電率を有する第2誘電体領域を備え、前記第1誘電体領域および前記第2誘電体領域のいずれか一方が誘電体材料から構成され、他方が気体から構成される請求項1～3のいずれかに記載の2次元フォトリック結晶。

【請求項5】 平板状の基部と、前記基部と同一の誘電体材料から構成され前記基部から立設する複数の前記第1誘電体領域とを備えることを特徴とする請求項4に記載の2次元フォトリック結晶。

【請求項6】 前記第1誘電体領域および前記第2誘電体領域は、各々異なる誘電率を有する誘電体材料から構成されることを特徴とする請求項1～3のい

ずれかに記載の 2 次元フォトニック結晶。

【請求項 7】 平板状の基部と、前記基部から立設し前記基部と同一の誘電体材料から構成される複数の前記第 1 誘電体領域と、前記第 1 誘電体領域の周囲を取り囲む第 2 誘電体領域を備えることを特徴とする請求項 6 に記載の 2 次元フォトニック結晶。

【請求項 8】 第 1 誘電体領域と前記第 1 誘電体領域と異なる誘電率を有する第 2 誘電体領域とを周期的に配置した 2 次元フォトニック結晶であって、

長方形断面を有する柱状の前記第 1 誘電体領域と、

前記第 1 誘電体領域の周囲を取り囲む前記第 2 誘電体領域とを備え、

X 方向において隣接する 2 つの前記第 1 誘電体領域の中心同士を結ぶ線分  $L_x$  と、前記 X 方向に直交する Y 方向において隣接する 2 つの前記第 1 誘電体領域の中心同士を結ぶ線分  $L_y$  とが、互いの略中点同士で略直交し、

前記線分  $L_x$  の長さ  $x_3$  と前記線分  $L_y$  の長さ  $y_3$  の比が  $1 : \text{略 } 3^{1/2}$  であり、

前記線分  $L_x$  の長さ  $x_3$ 、前記第 1 誘電体領域の前記 X 方向の長さ  $x_2$  および前記 Y 方向の長さ  $y_2$  の比が  $1 : 0.133 : 0.48 \sim 1 : 0.158 : 0.58$  に設定されることを特徴とする 2 次元フォトニック結晶。

#### 【発明の詳細な説明】

##### 【0001】

#### 【発明の属する技術分野】

本発明は、2 次元フォトニック結晶に関するものである。

##### 【0002】

#### 【従来の技術】

近年、誘電率を周期的に変化させた 2 次元または 3 次元の構造体であるフォトニック結晶が注目されている。ここで、2 次元、3 次元とは、周期性を有する方向の数に基づいて定められる。2 種類の誘電体の周期構造からなるフォトニック結晶に電磁波が入射してブラッグ回折を起こすと 2 つの定在波が生じる。低誘電率領域で生じる高エネルギーの定在波と、高誘電率領域で生じる低エネルギーの定在波である。フォトニック結晶中には、これら 2 つの定在波のエネルギーの間にある

エネルギーを有する波が存在できないため、フォトリックバンドギャップが発現する。フォトリックバンドギャップ中のエネルギー（波長）範囲の電磁波は、フォトリック結晶を通過することができなくなる。なお、ここでいうフォトリックバンドギャップとは、上述の現象を、結晶内電子のエネルギー準位のバンドギャップ（禁制帯）と同様に捉えたものである。

#### 【0003】

ここで、フォトリックバンドギャップを有する結晶の内部に周期性を乱す欠陥を導入すれば、この欠陥部分にのみ光が存在することができる。したがって、この結晶内に欠陥を閉じた領域として作製すれば光の共振器を得ることができ、また、この結晶内に欠陥を線状に作製すれば導波路を得ることができる。例えば、2次元フォトリック結晶の場合では、電界成分を周期構造の平面に平行になるTE波（Transverse Electric Wave）と、垂直になるTM波（Transverse Magnetic Wave）に分けることができる。一般的には、それぞれの光に対応するフォトリックバンドギャップの周波数 $\omega$ の範囲は必ずしも一致しないので、TE波とTM波の両方に対して同時にフォトリックバンドギャップが生じる周波数範囲が存在する場合、そのフォトリックバンドギャップは完全バンドギャップと呼ばれることがある。

#### 【0004】

2次元構造で完全バンドギャップが存在する比較的単純な構造のフォトリック結晶が知られている。このフォトリック結晶は、例えば、特開2001-272555号公報に開示されているように誘電体中に貫通孔（空気孔）を3角格子上に配列したものである。この場合、最も広い完全バンドギャップが得られるのは半径（ $r/a$ ）が0.48、また周波数（ $\omega a/2\pi c$ ）が0.5程度のときである。但し、 $r$ は孔の半径、 $a$ はフォトリック結晶の格子定数、 $\omega$ は光の角振動数、 $c$ は真空中の光速である。

#### 【0005】

##### 【特許文献1】

特開2001-272555号公報（第4頁、図1）

#### 【0006】

## 【発明が解決しようとする課題】

ところが、3角格子状に空気孔を配列した従来の2次元フォトニック結晶においては、完全バンドギャップが得られるのは孔の直径 $d (=2r) = 0.95a$ のときであるから、孔間の壁の厚さは最小部で $0.05a$ 、つまり $0.035\mu\text{m}$ と極めて薄いために、作製するのが困難であった。

## 【0007】

本発明は、このような技術的課題に基づいてなされたもので、製造が容易で、かつTE波およびTM波に対して完全バンドギャップを持つことのできる2次元周期構造を有するフォトニック結晶を提供することを目的とする。

## 【0008】

## 【課題を解決するための手段】

かかる目的のもと、本発明は短辺 $X_1$ の長さが $x_1$ 、長辺 $Y_1$ の長さが $y_1$ である長方形を単位格子とし、隣接する4つの単位格子が1つの角を共有するように配列された平面上で、短辺 $X_2$ の長さが $x_2$ 、長辺 $Y_2$ の長さが $y_2$ である長方形断面を有する柱状の第1誘電体領域を、各長方形単位格子の短辺 $X_1$ および長辺 $Y_1$ 上に配置した2次元フォトニック結晶である。

本発明は、上記2次元フォトニック結晶において、短辺 $X_1$ の midpoint および長辺 $Y_1$ の midpoint と長方形断面の中心が略一致するように第1誘電体領域が配置され、各第1誘電体領域の長辺 $Y_2$ 同士が互いに略平行をなしている。さらに、 $x_1 : y_1 = 1 : \text{略 } 3^{1/2}$ であり、 $x_1 : x_2 : y_2 = 1 : 0.133 : 0.48 \sim 1 : 0.158 : 0.58$ に設定してある。

## 【0009】

本発明の2次元フォトニック結晶において、 $x_1 : x_2 : y_2 = 1 : 0.135 : 0.48 \sim 1 : 0.150 : 0.54$ とすることが望ましく、 $1 : 0.135 : 0.52 \sim 1 : 0.140 : 0.54$ とすることがさらに望ましい。

以上の本発明によれば、第1誘電体領域は、最小でも $0.10\mu\text{m} \times 0.37\mu\text{m}$ 程度の長方形断面を有することになるから、従来の3角格子状に空気孔を配列した従来の2次元フォトニック結晶に比べて格段に製造性が優れる。しかも、後述するように、実用上十分な完全バンドギャップ幅を有している。

## 【0010】

本発明の2次元フォトニック結晶において、第1誘電体領域の周囲を取り囲みかつ第1誘電体領域とは異なる誘電率を有する第2誘電体領域を備えることがある。ここで、第1誘電体領域および第2誘電体領域は有体物のみならず気体を含む概念を有している。したがって本発明においては、第1誘電体領域および第2誘電体領域のいずれか一方を誘電体材料から構成し、他方を気体から構成することができる。気体の典型例が、空気である。また、第1誘電体領域および第2誘電体領域を、各々異なる誘電率を有する誘電体材料で構成することもできる。なお、本発明において、誘電体材料というときは有体物を意味するものとする。

## 【0011】

本発明による2次元フォトニック結晶は、平板状の基部と、基部と同一の誘電体材料から構成され基部から立設する複数の第1誘電体領域とを備える形態とすることができる。第2誘電体領域は、空気等の気体とすることができるし、誘電体材料とすることもできる。

## 【0012】

また本発明は、第1誘電体領域と第1誘電体領域と異なる誘電率を有する第2誘電体領域とを周期的に配置した2次元フォトニック結晶であって、長方形断面を有する柱状の第1誘電体領域と、第1誘電体領域の周囲を取り囲む第2誘電体領域とを備え、X方向において隣接する2つの第1誘電体領域の中心同士を結ぶ線分 $L_x$ と、X方向に直交するY方向において隣接する2つの第1誘電体領域の中心同士を結ぶ線分 $L_y$ とが、互いの略中点同士で略直交し、線分 $L_x$ の長さ $x_3$ と線分 $L_y$ の長さ $y_3$ の比が $1 : \text{略} 3^{1/2}$ であり、線分 $L_x$ の長さ $x_3$ 、第1誘電体領域のX方向の長さ $x_2$ およびY方向の長さ $y_2$ の比が $1 : 0.133 : 0.48 \sim 1 : 0.158 : 0.58$ に設定されることを特徴とする。

## 【0013】

## 【発明の実施の形態】

以下、添付図面に示す実施の形態に基づいてこの発明を詳細に説明する。

図1は、本実施の形態におけるフォトニック結晶1の構造を示す斜視図である。図1において、本実施の形態によるフォトニック結晶1は、基部12上に角柱

構造体 11 が複数配列した構造をなしている。角柱構造体 11 および基部 12 は例えば  $\text{BaO}-\text{TiO}_2$  系、 $\text{BaO}-\text{Nd}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$  系等の同一のまたは異なる誘電体材料から構成することができる。隣接する角柱構造体 11 の間は空隙 13 であり、空気が存在することになる。したがって、角柱構造体 11 が第 1 誘電体領域を、また隣接する角柱構造体 11 の間の空隙 13 が第 2 誘電体領域を構成することになる。そのため、フォトニック結晶 1 は 2 次元周期構造を有している。

#### 【0014】

図 2 は、フォトニック結晶 1 における、第 1 誘電体領域を構成する角柱構造体 11 の配置を説明するための図であり、フォトニック結晶 1 を平面視した模式図である。

図 2 に示すように、フォトニック結晶 1 上に、点線で示している正 6 角形が蜂の巣状に仮想的に配列されているものとする。この正 6 角形を構成する辺のうち、図中、Y 方向に平行な辺上に角柱構造体 11 を立設している。なお、図 2 は、フォトニック結晶 1 の一部のみを記載し、かつ角柱構造体 11 もその一部のみを記載している。

所定の正 6 角形 H を取り囲む 4 つの角柱構造体 11 により、角柱構造体 11 の周期的な構造の単位が構成されているものとする。この周期的な構造の単位を本発明において単位格子 L と定義する。この単位格子 L は、X 方向に平行に配置される 2 つの短辺 X1 および X 方向と直行する Y 方向に配置される 2 つの長辺 Y1 から構成され、長方形をなしている。そして、隣接する 4 つの単位格子 L は、1 つの角 C を共有している。なお、ここでいう単位格子 L は、これを並進操作することにより平面を重複も隙間も無く埋め尽くすことができるものであることは言うまでもない。

#### 【0015】

単位格子 L において、X 方向に平行に配置される 2 つの短辺 X1 上、および Y 方向に平行に配置される 2 つの長辺 Y1 上には各々角柱構造体 11 が配設される。この角柱構造体 11 が第 1 誘電体領域を構成する。また、角柱構造体 11 の周囲を取り囲む部分が第 2 誘電体領域を構成する。なお、図 2 では角柱構造体 11



からなる第1誘電体領域を誘電体材料で構成し、その周囲に存在する第2誘電体領域を空気とすることを前提としているが、第1誘電体領域の部分を空気とし、その周囲に存在する第2誘電体領域を誘電体材料から構成することも可能である。また、図4に示すように、第1誘電体材料から構成される角柱構造体111と、第2誘電体材料から構成され角柱構造体111を取り囲む空隙113とから本発明によるフォトニック結晶100を構成することができる。第1誘電体材料と第2誘電体材料は誘電率が相違する。なお、フォトニック結晶100の基部112は第1誘電体材料から構成されている。

#### 【0016】

本発明によるフォトニック結晶1は、この単位格子Lおよび単位格子L中に配設される角柱構造体11のサイズに特徴を有している。そこで次に、図3に基づいてこの特徴点について説明する。

図3(a)は本実施の形態によるフォトニック結晶1の単位格子Lを記載している。図3(b)は角柱構造体11を除き単位格子Lのみを記載し、また図3(c)は角柱構造体11のみを記載している。

#### 【0017】

本発明によるフォトニック結晶1は、図3(b)に示す単位格子Lの短辺X1の長さ $x_1$ と長辺Y1の長さ $y_1$ とを $x_1 : y_1 = 1 : \text{略} 3^{1/2}$ に設定する。 $x_1 : y_1$ は、厳密には $1 : 3^{1/2}$ であるが、誤差を考慮して $1 : \text{略} 3^{1/2}$ としている。本発明において、他に略を用いている場合も同様である。ここで、各々の角柱構造体11は、短辺X1同士、および長辺Y1同士が互いに略平行をなしている。また、角柱構造体11の短辺X2は単位格子Lの短辺X1と略平行をなし、長辺Y2は単位格子Lの長辺Y1と平行をなしている。

また、図3(c)に示す角柱構造体11の短辺X2の長さ $x_2$ と長辺Y2の長さ $y_2$ を、 $x_1 : x_2 : y_2 = 1 : 0.133 : 0.48 \sim 1 : 0.158 : 0.58$ に設定する。

ここで、X方向において隣接する2つの角柱構造体11の中心同士を結ぶ線分 $L_x$ と、Y方向において隣接する2つの角柱構造体11の中心同士を結ぶ線分 $L_y$ とは、互いの略中点同士で略直交する。線分 $L_x$ の長さ $x$ と線分 $L_y$ の長さ $y$ は、

1 : 略  $3\frac{1}{2}$  の比率を有している。

また、短辺 X 1 上に配置される角柱構造体 1 1 はその中心と短辺 X 1 の中点とが略一致し、また長辺 Y 1 上に配置される角柱構造体 1 1 の中心と長辺 Y 1 の中点とが略一致する。

なお、角柱構造体 1 1 の中心とは、平面方向の中心をいう。

#### 【0018】

本発明において、以上の比率は、シミュレーション（詳しくは後述する）により求めたフルバンドギャップ幅に基づいて採用した。

図 5 は、 $x_1 : y_1 = 1 : 3\frac{1}{2}$  に固定し、 $x_2$  および  $y_2$  を変動させて行ったフルバンドギャップ幅のシミュレーション結果を示す図である。図 5 に示すように、 $x_2$  および  $y_2$  を選択することにより、高いフルバンドギャップ幅を得ることができる。

#### 【0019】

図 6 は、所定の  $x_2$ 、 $y_2$  におけるフルバンドギャップ幅の値を記述している。

22. 5%以上の広いフルバンドギャップ幅が得られているプロットを黒色に塗りつぶしている。黒色プロットは、 $x_1 : x_2 : y_2 = 1 : 0.133 : 0.48 \sim 1 : 0.158 : 0.58$  の範囲に含まれる。 $1 : 0.133 : 0.48 \sim 1 : 0.148 : 0.53$  の範囲においては、26%以上のフルバンドギャップ幅を得ることができる。また、 $1 : 0.133 : 0.52 \sim 1 : 0.14 : 0.53$  の範囲においては、28%以上のフルバンドギャップ幅を得ることができる。

#### 【0020】

次に、以上のシミュレーションによるフルバンドギャップ幅の算出方法の概略を説明しておく。

計算にはフォトリック結晶の透過特性シミュレータである“トランスライト” (Translight) を使用した。このソフトウェアは、アンドリュー・レイノルズ (Andrew Reynolds) 氏がグラスゴー (Glasgow) 大学に在籍中に開発したものである。計算方法としてトランスファーマトリックス法 (Transfer Matrix Method)

を使用している。このソフトウェアでは、円柱および角柱を自由に配置し、これらの集合体であるフォトニック結晶構造に対しTE波およびTM波を入射したときの反射および透過特性を計算するものである。入射は $0 \sim 90^\circ$ の任意の角度範囲で行うことができ、任意の周波数範囲に対して解を得ることができる。

#### 【0021】

シミュレータに、計算したいフォトニック結晶構造形状、周波数領域、TE波とTM波の入射角範囲、および使用する誘電体の誘電率を代入した。入射角は $0 \sim 90^\circ$ とした。計算したフォトニック結晶構造はx-y（図3のx-yと整合させる必要有）平面に対して対称形であるため、この入射角でy-z（図3のx-yと整合させる必要有）面から入射するすべての電磁波入射をカバーしている。これを計算（シミュレーション）することにより、TE波およびTM波の各入射角度において、周波数に対する反射および透過減衰量が得られた。この透過減衰量が50 dB以上である場合にバンドギャップが生じたと認定した。そこで透過減衰量が50 dB以上である入射角度および周波数をTE波およびTM波に対して抽出した。ある周波数に対してTE波およびTM波のすべての入射角に対しバンドギャップが生じているとき、その周波数でフルバンドギャップが形成されたことになる。そこで各周波数に対しフルバンドギャップの有無を確認した。フルバンドギャップが周波数に対し連続して存在している場合、その周波数幅を、周波数幅の中心周波数で割った値をフルバンドギャップ幅（%）とした。このフルバンドギャップ幅をフォトニック結晶形状（角柱構造体11のx2およびy2のサイズ）に対しプロットしたものが図5および図6である。

#### 【0022】

次に、フォトニック結晶1の好適な製造方法を図7および図8を用いて説明する。

この製造方法は、マサチューセッツ工科大学（MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY）で開発されたスラリベースの3DP（Three Dimensional Printing）プロセスを用いる。この3DPプロセスの基本的な手順が図7に示されている。このプロセスを適用できる材料はスラリ化できるものであればよく、材料選択が制約されることがない。例えば、アルミナ（ $Al_2O_3$ ）、シリコンカーバイ

ド (S i C)、チタン酸バリウム (B a T i O<sub>3</sub>)、チタン酸ジルコン酸鉛 (P L T)、B a O-N d<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-T i O<sub>2</sub>などのセラミックはもちろん、アクリルやポリカーボネートなどのプラスチック、A lやC u、A gなどの金属、S iやG a A sなどの半導体を用いることもできる。

#### 【0023】

3DPプロセスにおいてはまず、図7に示すように、スラリ作成工程S1で、角柱構造体11および基部12を構成する誘電体粉末を溶媒に分散させてスラリ化する。溶媒は、アルコールなどの有機溶媒を用いることができるが、毒性がなく、取り扱いが容易で、誘電体粉末に対する影響が少ないなどの理由から、水をベースとすることが望ましい。必要に応じて溶媒に分散剤などを添加する。2種類以上の誘電体粉末を用いて角柱構造体11および基部12を作成することもできる。

#### 【0024】

次に、スラリ印刷工程S2で、ジェットプリント法を用いて、誘電体粉末を含むスラリを基材上の表面に1層分だけ印刷形成する。印刷される誘電体層の層厚は、乾燥工程における収縮率などを考慮して決定する。

次に、スラリ乾燥工程S3で、スラリ印刷工程S2において印刷形成した誘電体層から溶媒を乾燥、除去する。乾燥させる方法は、自然乾燥でも加熱乾燥でもよい。

次に、バインダ印刷工程S4で、すでに形成した誘電体層の所定部分に、ジェットプリント法によりバインダが印刷塗布される。バインダは、角柱構造体11および基部12を構成する部分に塗布される。バインダの吐出量は、誘電体層の1層分に浸透するように調整させる。

バインダ印刷工程S4で用いるバインダの種類は特に制限されないが、取り扱いの容易さや、誘電体粉末に対する影響が少ないこと、毒性がないことなどの理由から、水を溶媒とする水溶性のものが好ましい。また、バインダにより硬化されていない粉末を誘電体の成形体から水中で再分散処理して除去する(工程S8)ために、バインダは硬化後には非水溶性であることが必要である。さらに、硬化後の機械的強度なども考慮すると、バインダとして熱硬化性樹脂を用いること

が好ましく、特にポリアクリル酸（PAA: polyacrylic acid）が好ましい。

#### 【0025】

次に、バインダ乾燥工程 S5 で、誘電体層に浸透させたバインダに含まれる溶媒を乾燥除去する。乾燥方法は、自然乾燥でも加熱乾燥でもよい。このバインダ乾燥工程 S5 を経た誘電体層は、バインダが浸透した領域に存在する誘電体粉末が当該バインダにより結合される。

#### 【0026】

上記のスラリ印刷工程 S2 からバインダ乾燥工程 S5 までの各工程を所定回数だけ繰り返す（図7、判断工程 S6）。そうすると、バインダによって誘電体粉末が結合された領域（結合領域）と、そうでない領域（未結合領域）とが混在したブロック状成形体が形成される。具体的には後述するが、前記結合領域が第1誘電体領域をなす角柱構造体 11 を、また前記未結合領域が第2誘電体領域をなす空隙 13 を構成する。この2つの結合領域および未結合領域が、平面視して図2、図3に示すように周期的に配置されるように、バインダ印刷工程 S4 において、バインダを印刷するのである。

#### 【0027】

上記各工程が所定回数だけ繰り返されたならば、バインダ硬化工程 S7 に進む。

バインダ硬化工程 S7 では、前記各工程の繰り返しにより所定の層数だけ印刷して得た成形体を熱処理するなどして、バインダ印刷工程 S4 において誘電体層中に浸透されたバインダを十分に硬化させる。この処理により誘電体粉末同士は硬化バインダによってより強く結合されるため、誘電体粉末同士の結合強度が高くなり、後の取り扱いが極めて容易になる。

#### 【0028】

バインダ硬化工程 S7 の後に、未結合領域除去工程 S8 が実施される。

未結合領域除去工程 S8 では、未結合領域に存在する誘電体粉末を成形体から除去する。この除去は、積層された誘電体層からなる成形体を水に浸漬して行うことができる。つまり、バインダで結合されていない誘電体粉末は、水中に浸漬されることにより、誘電体層から離脱して浸漬した水中に再分散される。

## 【0029】

なお、除去工程（工程 S 8）で、バインダによって結合されていない誘電体粉末が水に再分散しやすいように、スラリー作成工程 S 1 においてスラリー中に分散剤を予め添加しておくことが好ましい。分散剤としては、例えばポリエチレングリコール（PEG: Polyethylene glycol）を用いればよい。再分散を行うときに、成形体を浸漬する水または当該成形体自身に超音波を印加することが効果的である。

除去工程（工程 S 8）が終了した後に、誘電体粉末がバインダにより角柱構造体 11 の形状に結合された成形体を水から引き上げて、乾燥工程 S 9 を実施する。この乾燥工程 S 9 も、自然乾燥でも加熱乾燥でもよい。

## 【0030】

なお、乾燥工程 S 9 を経た成形体をそのままフォトニック結晶 1 として用いても良いが、必要に応じてさらに焼成工程 S 10 で焼成して焼結体としてもよい。焼結体とすることにより、機械的強度や誘電率がさらに向上する。

以上では、バインダ硬化工程 S 7 を経た後に未結合領域除去工程 S 8 を実施した。しかし、バインダが浸透した領域の誘電体粉末の密度、用いるバインダの性状等によっては、バインダ硬化工程 S 7 を経ることなく、未結合領域除去工程 S 8 を実施することも可能である。本発明は、この形態をも包含している。

## 【0031】

次に、上述したフォトニック結晶 1 の製造方法の各工程について図 8 を参照しつつより具体的に説明する。

図 8（a）は、スラリー印刷工程 S 2 においてジェットプリントヘッド 22 から誘電体粉末を含むスラリー 23 を吐出して、基板 21 上に 1 層目の誘電体層を形成する様子を模式的に示している。

スラリー吐出用のジェットプリントヘッド 22 を 2 次元に走査させながら誘電体粉末を含むスラリー 23 を連続的に吐出させることにより、基板 21 上の一面にスラリー 23 を 1 層分だけ印刷形成する。なお、ここでは、ジェットプリントヘッド 22 を固定して基板 21 を移動させても良い。

## 【0032】

基板 2 1 が多孔質であると、印刷された誘電体層中の溶媒が基板 2 1 中に吸収されて誘電体粉末の密集度が高くなり、誘電体粉末の成形密度が高くなる。この目的のために、基板 2 1 として焼結アルミナなどを用いることができる。なお、スラリー 2 3 を構成する誘電体粉末からなる成形体そのものを基板 2 1 としてもよい。

スラリー乾燥工程 S 3 でスラリー 2 3 中に含まれる溶媒を乾燥除去すると、誘電体層が 1 層分だけ形成される。

1 層目の誘電体層を形成した後に、図 8 (b) に示すように、バインダ印刷工程 S 4 を実施する。

図 8 (b) は、バインダ印刷工程 S 4 においてジェットプリントヘッド 2 4 からバインダ 2 5 を吐出して所定部分のみに印刷塗布する様子を模式的に示している。

#### 【0033】

バインダ吐出用のジェットプリントヘッド 2 4 を走査しながらバインダ 2 5 を連続的に吐出することにより、印刷形成された誘電体層の全面にバインダ 2 5 を浸透させる。なお、図 8 においてバインダ 2 5 が浸透した領域には網掛け（グラデーション）を施している。ジェットプリントヘッド 2 4 から吐出されるバインダ 2 5 の量は、誘電体層の全域に十分に浸透するように制御される。バインダ 2 5 を印刷塗布した後に、バインダ 2 5 を乾燥除去させるバインダ乾燥工程 S 5 を実施する。

#### 【0034】

1 層目の誘電体層に対するバインダ乾燥工程 S 5 を実施後に、2 層目のスラリー 2 3 の印刷、2 層目の誘電体層に対するバインダ 2 5 の印刷・乾燥、さらに 3 層目のスラリー 2 3 の印刷を上記と同様に実施する。3 層目のスラリー 2 3 を印刷し、スラリー 2 3 中に含まれる溶媒を除去した後に、バインダ 2 5 の印刷を行う。この様子を図 8 (c) に示している。図 8 (c) では、ジェットプリントヘッド 2 4 を走査しながら、バインダ 2 5 を断続的に吐出する。図 8 (c) において、ハッチングが施されている誘電体層中の白抜きの領域に対応する部分ではバインダ 2 5 の吐出が停止される。この白抜きの領域にはバインダ 2 5 が浸透していない。

## 【0035】

5層目の誘電体層までは図8(c)と同様に断続的なバインダ25の印刷を実行する。こうして得られた成形体が図8(d)に示されている。

図8(d)に示すように、この成形体はバインダ25が存在する領域と、そうでない領域が周期的に配設されている。図8(d)に示す成形体は、次にバインダ硬化工程S7に供される。この工程では、成形体中に浸透したバインダ25を硬化させるための熱処理を施す。

## 【0036】

図8(e)は、図8(d)に示す成形体から、バインダ25により硬化されていない領域に存在する誘電体粉末を除去した状態を模式的に示している。バインダ硬化工程S7を経た成形体を基板21からはずして、水に浸漬する。そうすることにより、成形体中のバインダ25により硬化されていない領域に存在する誘電体粉末を水に再分散して除去する。誘電体粉末が除去された部分は空気が存在する空隙13となる。このとき、超音波を印加することが有効である。誘電体粉末が除去された領域は空隙13となるから、この成形体は、誘電体粉末が存在する角柱構造体11と、空気からなる空隙13とが周期的に配置されたフォトニック結晶1を構成する。なお、この構造体をさらに焼成しても良いことは前述の通りである。

## 【0037】

図8(e)に示す成形体は第2誘電体領域として空気を用いるフォトニック結晶1であるが、第2誘電体領域として空気以外の誘電体材料を用いるフォトニック結晶1を作成することもできる。

図8(f)は、上述の方法により図8(e)に示すような成形体または焼結体を作成した後に、その空隙113に角柱構造体111とは異なる誘電体材料を充填したものを示している。第1誘電体領域と第2誘電体領域との誘電率の差は、目的とするフォトニック結晶100の特性に応じて決定すればよい。

## 【0038】

図8はフォトニック結晶1(100)の側断面について示したものであるが、平面視した場合には、図3に示したように角柱構造体11が配置されるようにジ



ェットプリントヘッド24を走査する。このとき、バイнда25は、角柱構造体11(111)が形成される部分に印刷される。

#### 【0039】

また、以上では、3DPプロセスにより本発明のフォトニック結晶1、100を得る方法について説明したが、ドライエッチング法、自己クローニング法および光造形法など公知の方法によることもできる。各方法について簡単に言及しておく。

ドライエッチング法は、フォトリソグラフィ技術で作製したマスクを用いてエッチングガスにより材料を所望の形状にエッチングする方法である。自己クローニング法は、特定のモードでバイアスパッタリングを行うことにより、基材の凹凸の周期を保存しつつ基材に垂直な方向に材料を堆積させる方法である。また、光造形法は、液状の光硬化性樹脂に紫外光ビームを走査し、照射領域のみ重合反応させて光硬化性樹脂を所望の形状に硬化させる方法である。

これ以外にも、本発明の主旨を逸脱しない限り、上記実施の形態で挙げた構成を取捨選択したり、他の構成に適宜変更することが可能であることはいうまでもない。例えば、結晶内に閉じた欠陥領域を形成して光の共振器を得ること、また、この結晶内に線状欠陥を形成して導波路を得ることができる。

#### 【0040】

##### 【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、製造が容易で、かつTE波およびTM波に対して完全バンドギャップを持つことのできる2次元周期構造を有するフォトニック結晶が提供される。

##### 【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明によるフォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図2】 本発明によるフォトニック結晶の単位格子および角柱構造体の配列を示す図である。

【図3】 本発明によるフォトニック結晶において、単位格子および角柱構造体のサイズを説明するための図である。

【図4】 本発明によるフォトニック結晶の他の例を示す斜視図である。

【図 5】 シミュレーションにより得られたフルバンドギャップ幅を示す散布図である。

【図 6】 シミュレーションにより得られたフルバンドギャップ幅を示す散布図である。

【図 7】 本発明によるフォトニック結晶に好適な製造方法を示すフローチャートである。

【図 8】 本発明によるフォトニック結晶に好適な製造方法の所定の工程を示す図である。

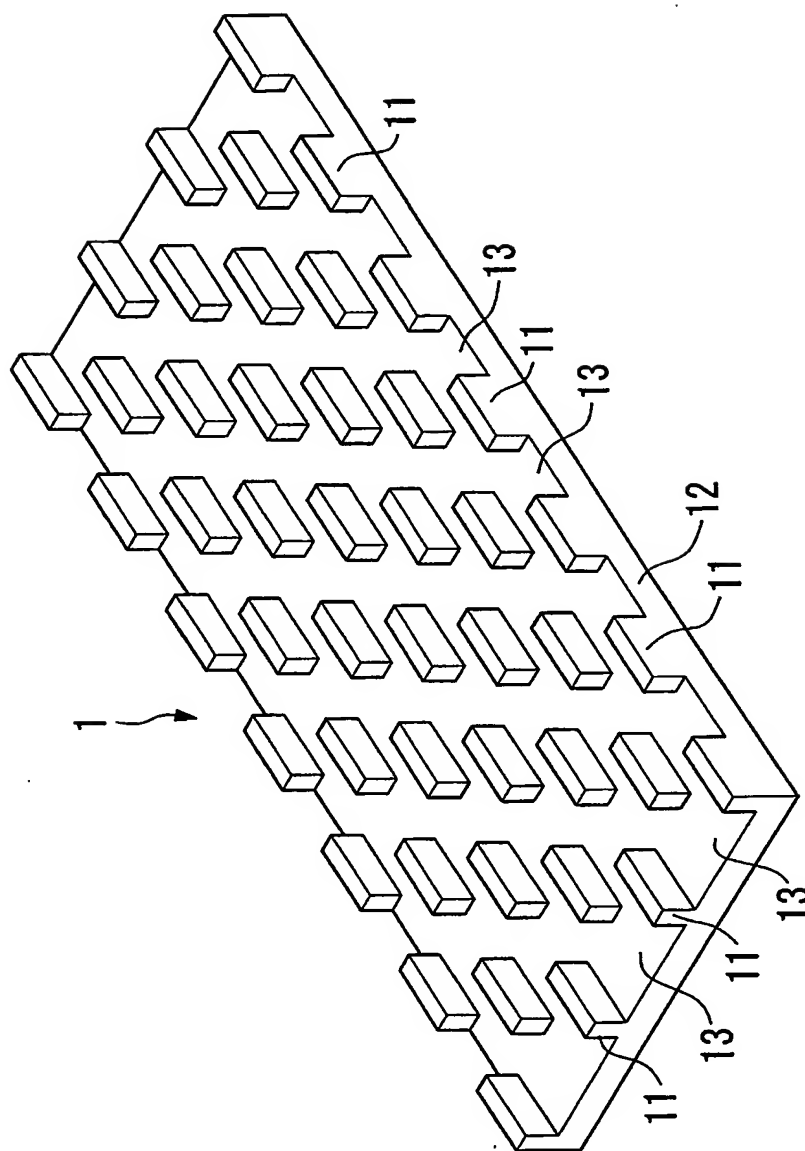
【符号の説明】

1, 100…フォトニック結晶、11, 111…角柱構造体、12, 112…基部、13, 113…空隙、L…単位格子、21…基板、22, 24…ジェットプリントヘッド、23…スラリ、25…バインダ

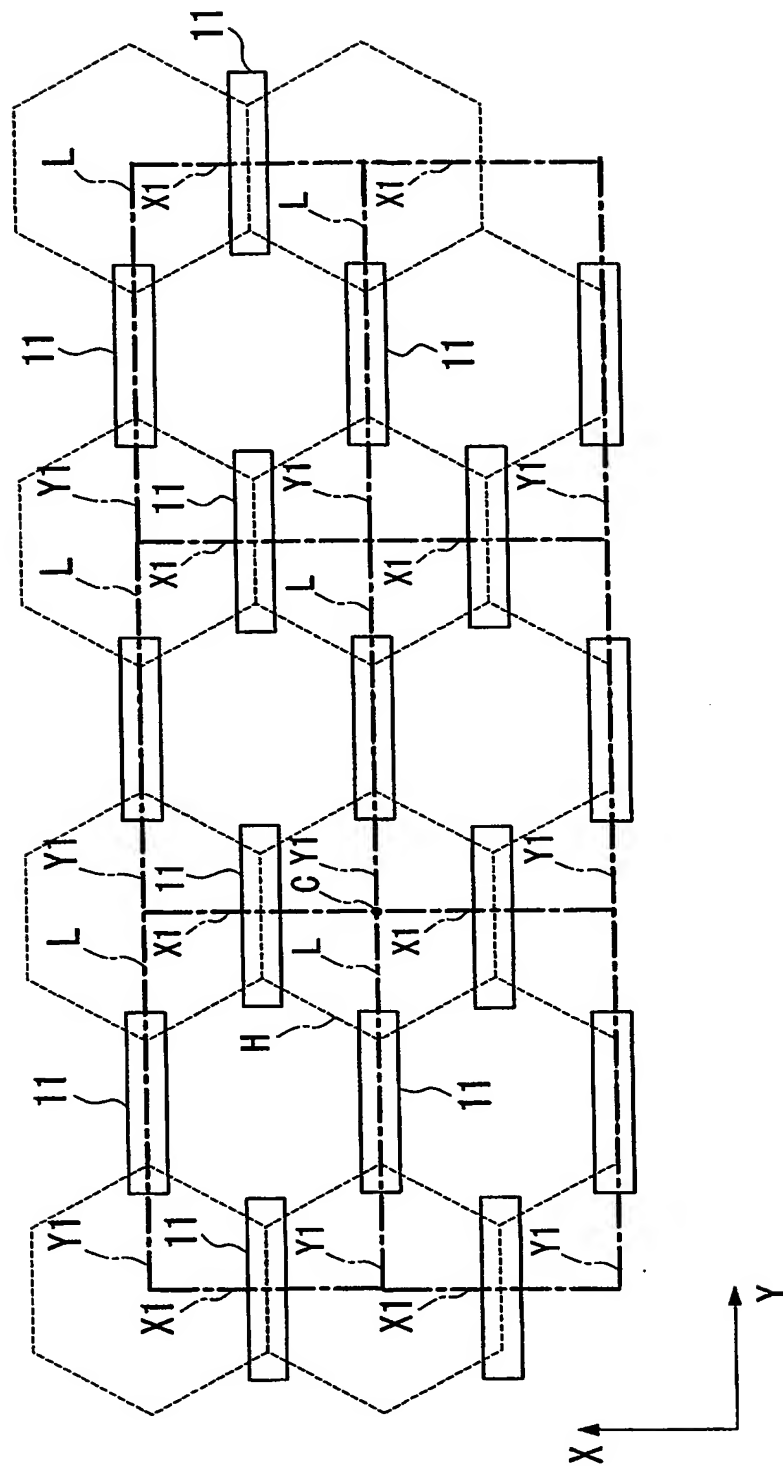
【書類名】

図面

【図 1】

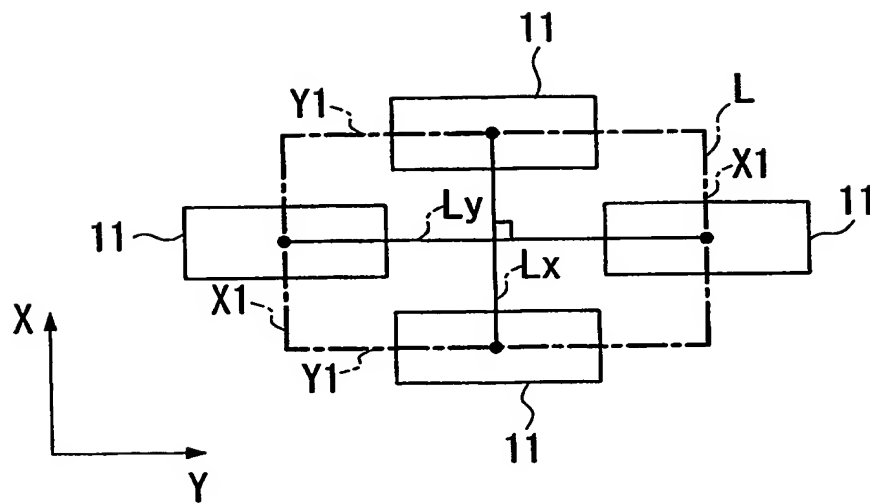


【図 2】

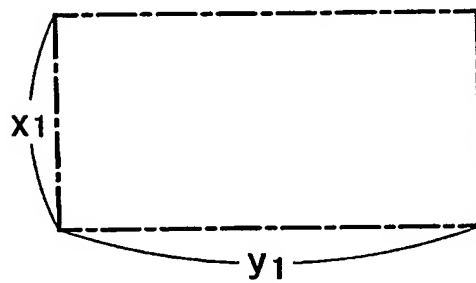


【図 3】

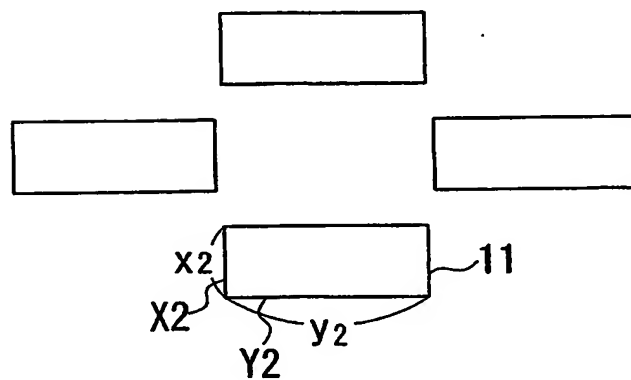
(a)



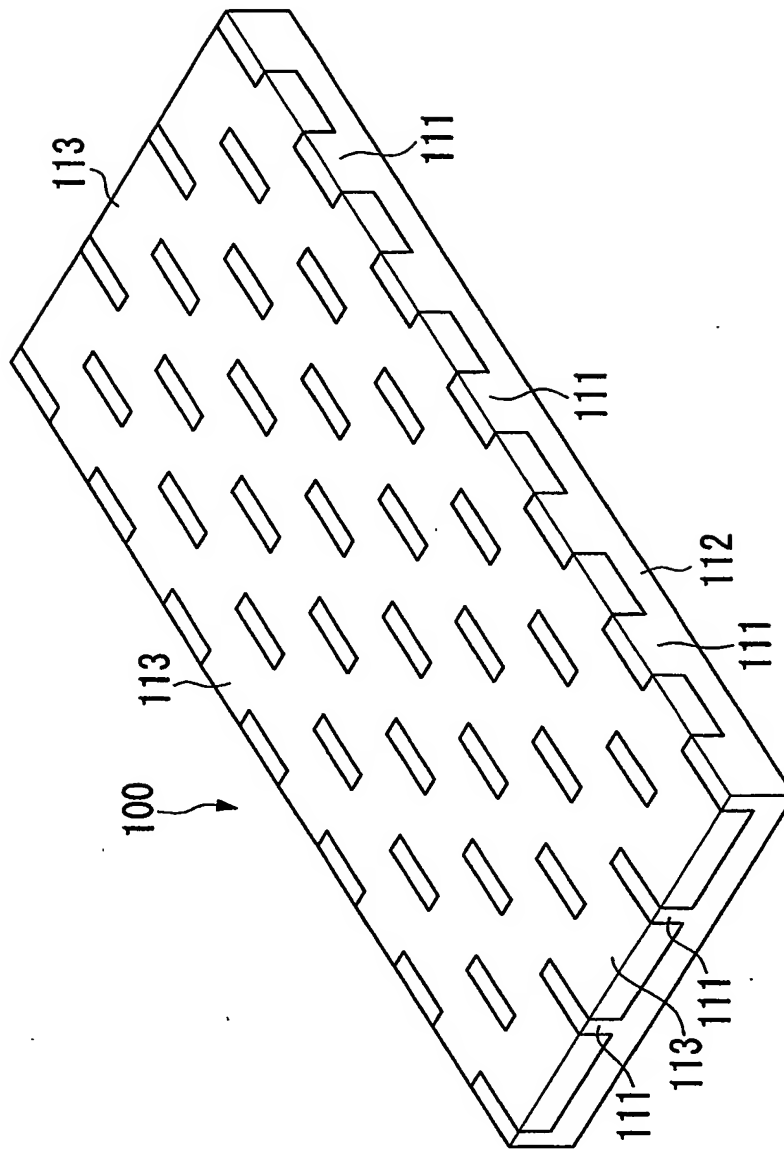
(b)



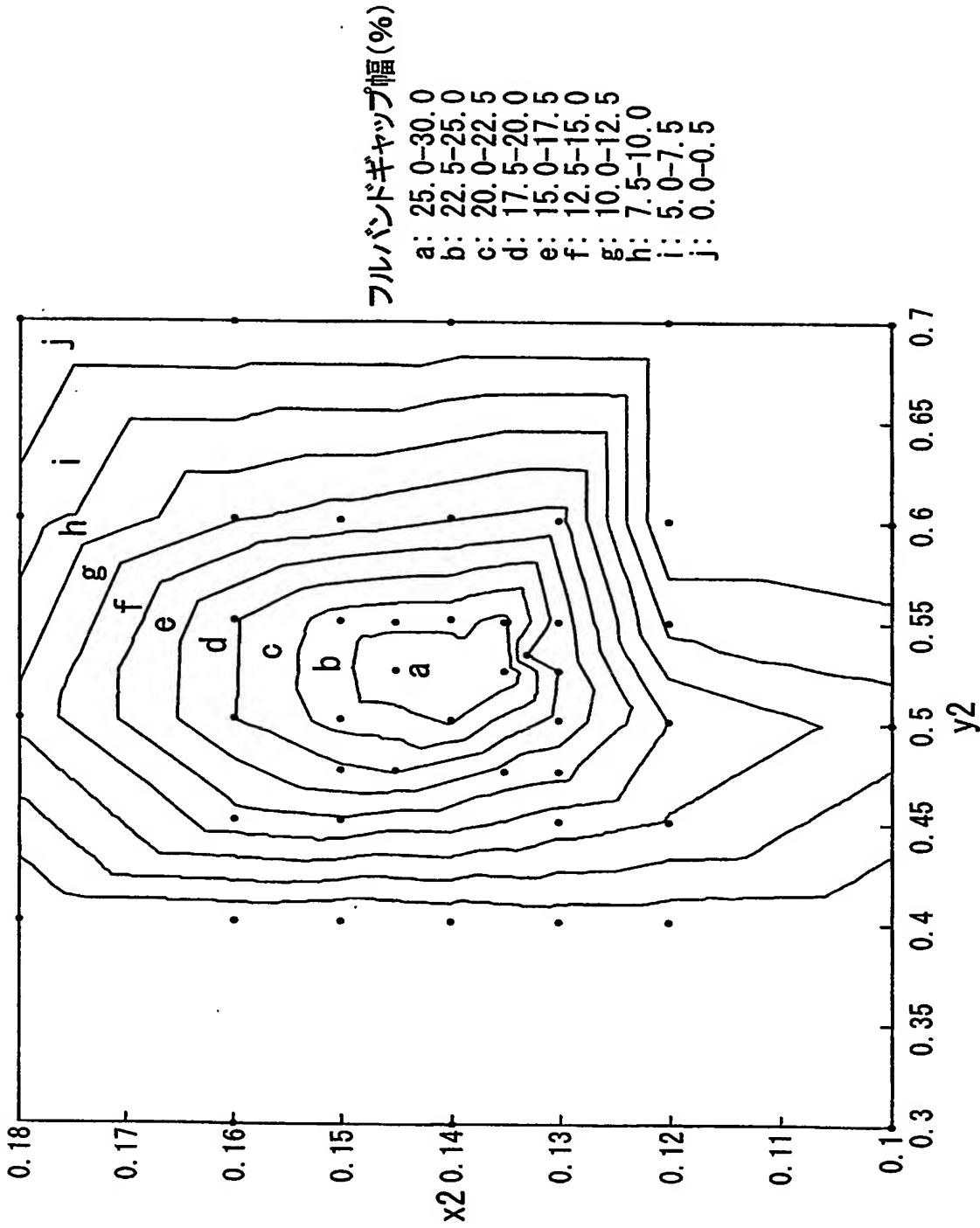
(c)



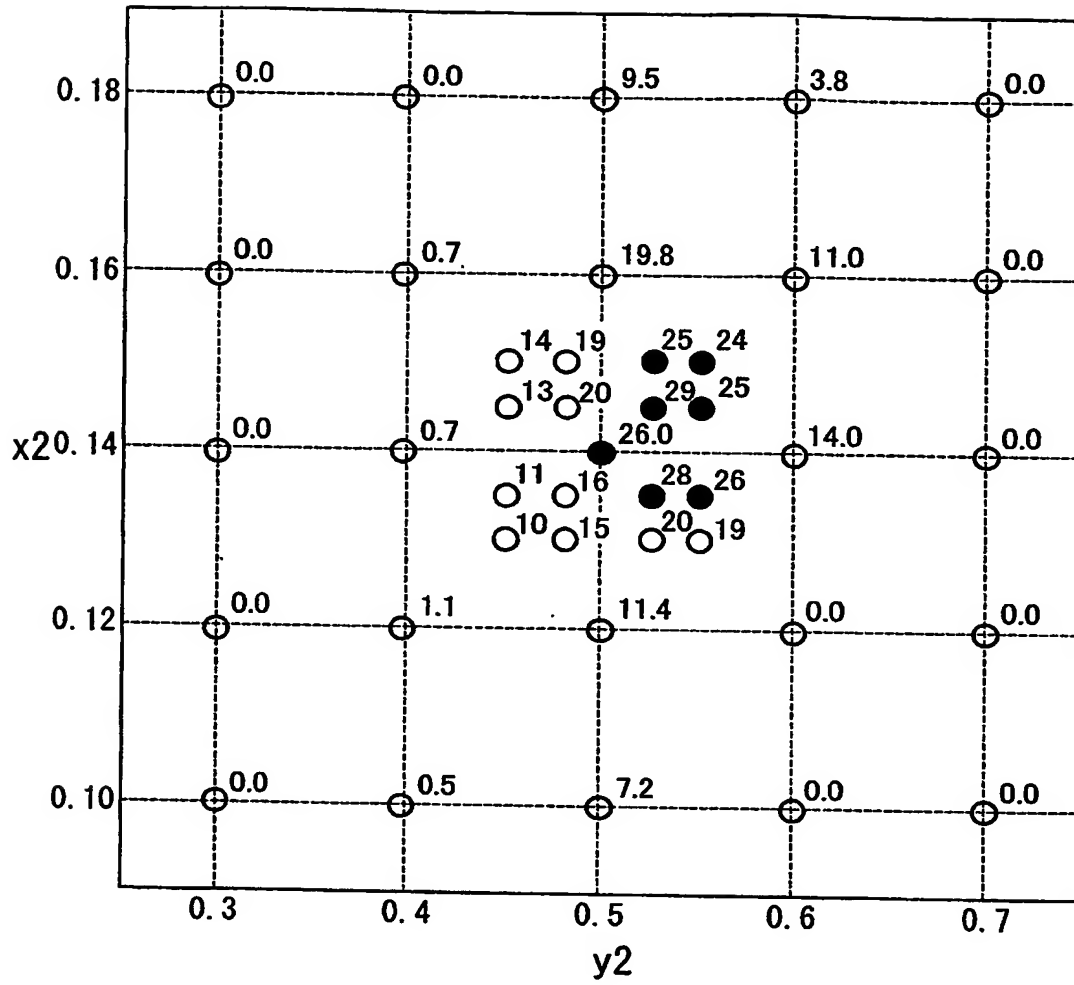
【図 4】



【図 5】

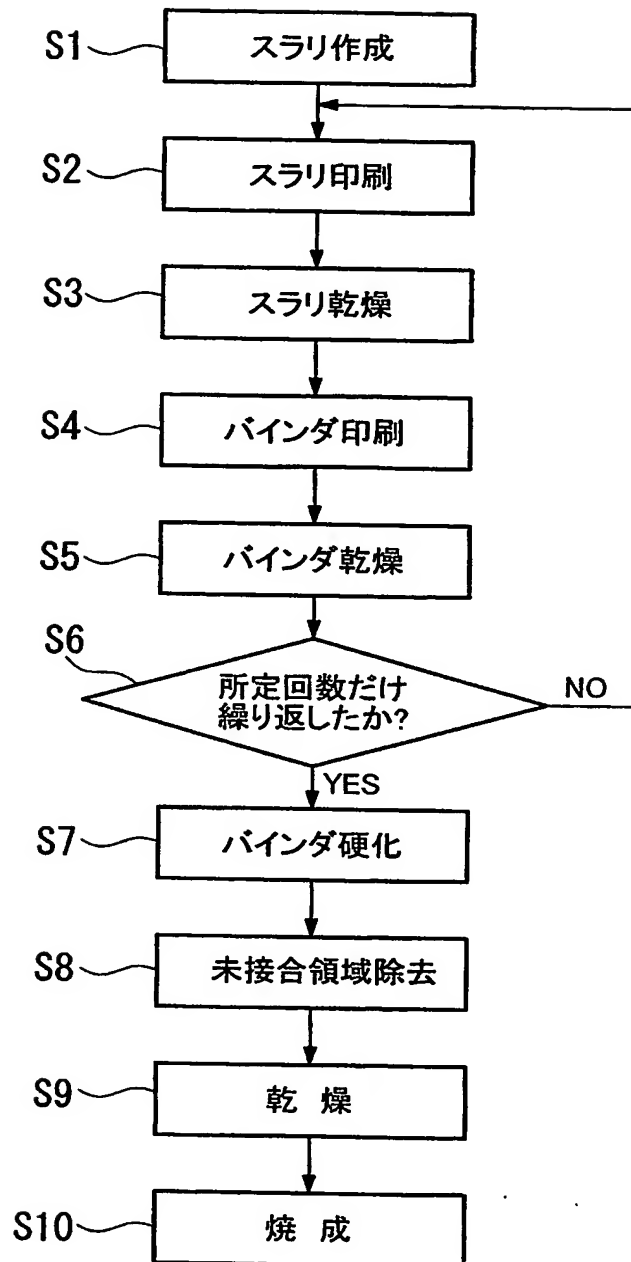


【図 6】

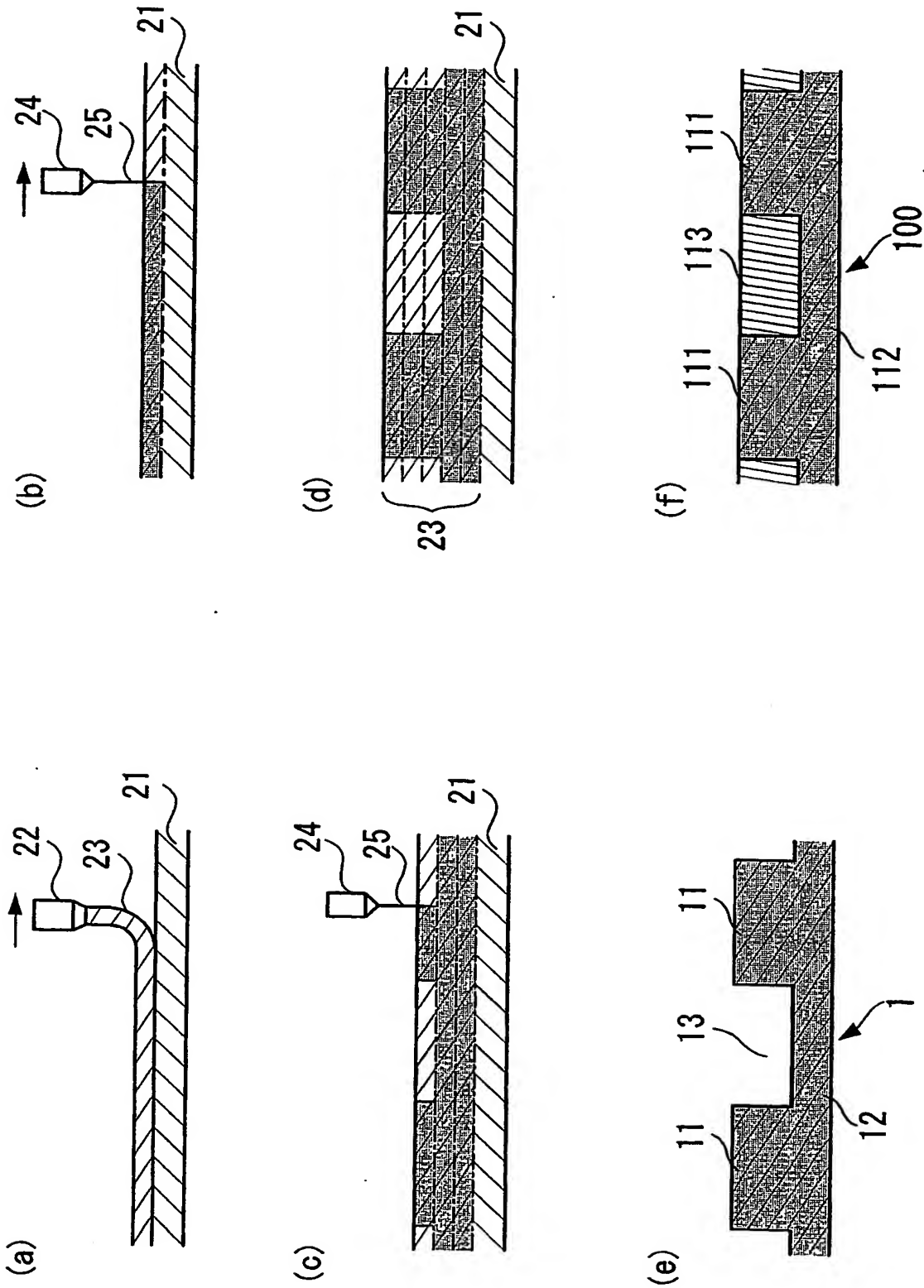




【図 7】



【図8】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 製造が容易で、かつTE波およびTM波に対して完全バンドギャップを持つことのできる2次元周期構造を有するフォトニック結晶を提供する。

【解決手段】 短辺X1の長さが $x_1$ 、長辺Y1の長さが $y_1$ である長方形を単位格子Lとし、隣接する4つの単位格子Lが1つの角を共有するように配列された平面上で、短辺X2の長さが $x_2$ 、長辺Y2の長さが $y_2$ である長方形断面を有する柱状の第1誘電体領域を、各長方形の単位格子Lの短辺X1および長辺Y1上に配置したフォトニック結晶である。上記フォトニック結晶において、短辺X1の midpoint および長辺Y1の midpoint と長方形断面の中心が略一致するように第1誘電体領域が配置され、各第1誘電体領域の長辺Y2同士が互いに略平行をなしている。さらに、 $x_1 : y_1 = 1 : \text{略 } 3^{1/2}$ であり、 $x_1 : x_2 : y_2 = 1 : 0.133 : 0.48 \sim 1 : 0.158 : 0.58$ に設定してある。

【選択図】 図3

特願 2 0 0 3 - 0 2 4 9 3 6

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [0 0 0 0 0 3 0 6 7]

1. 変更年月日 1 9 9 0 年 8 月 3 0 日  
[変更理由] 新規登録  
住 所 東京都中央区日本橋 1 丁目 1 3 番 1 号  
氏 名 ティーディーケイ株式会社
2. 変更年月日 2 0 0 3 年 6 月 2 7 日  
[変更理由] 名称変更  
住 所 東京都中央区日本橋 1 丁目 1 3 番 1 号  
氏 名 T D K 株式会社